

doi:10.3788/gzxb20164512.1206004

可双参量同时测量的光纤磁场传感器

赵月¹, 曹晔², 童峥嵘¹, 王艳¹

(1 天津理工大学 计算机与通信工程学院 教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384)

(2 青岛大学 电子信息学院, 山东 青岛 266071)

摘 要:设计并制作了一种马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)与光纤布喇格光栅级联的光纤磁场传感器,其中 MZI 由相当于分光器的锥结构和相当于耦合器的花生锥结构级联组成,封装在填充了磁流体的毛细管中.由于磁流体的有效折射率会随着外界磁场强度的改变而变化,故可通过观察干涉谱的特征波长的变化来测量外界磁场强度,而光纤布喇格光栅透射峰对磁场强度不敏感.当磁场强度由 0 mT 变化到 20 mT 时,马赫-曾德尔干涉峰的灵敏度为 0.11 nm/mT. 温度特性实验测得马赫-曾德尔干涉峰和光纤布喇格光栅透射峰的温度灵敏度分别为 0.401 5 nm/°C 和 0.011 4 nm/°C. 因此,可利用敏感矩阵实现双参量同时测量.

关键词:光纤传感器;马赫-曾德尔干涉仪;锥结构;花生锥结构;FBG;磁场;温度

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1206004-5

Simultaneous Measurement of Dual-parameter Based on Optical Fiber Magnetic Field Sensor

ZHAO Yue¹, CAO Ye², TONG Zheng-rong¹, WANG Yan¹

(1 Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(2 School of Electronic and Information Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: An optical fiber magnetic field sensor was proposed and demonstrated. The sensor head is composed of a Mach-Zehnder Interferometer (MZI) cascading with a Fiber Bragg grating (FBG). The MZI consists of a taper structure and a peanut-shape structure, which are encapsulated in capillary with Magnetic Fluid (MF). The taper structure and peanut-shape structure is equivalent to an optical splitter and a coupler respectively. The external magnetic field intensity can be measured by the variation of characteristic wavelength as the effective refractive index of MF changes with the variation of magnetic field intensity. The transmission peak of FBG is insensitive to magnetic field intensity, the experimental results show that, when the magnetic field intensity varies from 0mT to 20 mT, the magnetic field sensitivity is 0.11 nm/mT. Experimental results show that, the temperature sensitivities of the interference peak of MZI and the transmission peak of FBG are 0.401 5 nm/°C and 0.011 4 nm/°C, respectively. Therefore, the simultaneous measurement of the magnetic field intensity and temperature is demonstrated based on the sensitive matrix.

Key words: Fiber sensor; Mach-Zehnder interferometer; Taper structure; Peanut-shape structure; FBG; Magnetic field; Temperature

OCIS Codes: 060.2310; 060.2300; 060.2330; 060.2370

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(No. 2013AA014200)、国家自然科学基金应急管理项目(No. 11444001)和天津市自然科学基金(No. 14JCYBJC16500)资助

第一作者:赵月(1990—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email:13821538563@163.com

导师(通讯作者):曹晔(1976—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为光纤通信与光纤传感. Email:cynever@163.com

收稿日期:2016-06-17; **录用日期:**2016-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤磁场传感器有灵敏度高、结构小巧、不易受外界环境干扰等特点,其在航天航空、冶金、医疗等领域有着广泛应用^[1-3].但由于光纤本身对于磁场是不敏感的,要实现磁场的测量必须利用其他手段,主要方法有两种:一种是利用某种介质使光和磁场产生法拉第效应^[4-5];另一种是利用磁场敏感材料如磁致伸缩材料^[6-7]、磁流体^[8-9]等对光纤传感器进行封装.磁场敏感材料中应用最广泛的就是磁流体(Magnetic Fluid, MF),主要由纳米磁性粒子、表面活性剂、基液组成.磁流体是一种稳定的胶体溶液,是把表面活性剂包裹在纳米磁性粒子上,然后均匀地分散在基液中形成的.磁流体具有良好的磁光效应,例如可调折射率特性、双折射特性等^[10-11],因此备受国内外研究人员的青睐.2012年,祖鹏等^[12]提出一种基于MZ干涉仪和磁流体的光纤磁场传感器,其中,MZ干涉仪是基于坍塌的光子晶体光纤制作而成,测得的磁场强度的灵敏度为0.023nm/mT.2014年,苗银萍等^[13]提出一种基于偏芯结构和磁流体的双向磁场传感器,垂直和平行于光纤轴的磁场灵敏度分别为-0.02534 dB/Oe和0.01111 dB/Oe.2015年,Guojing Huang等^[14]提出一种基于细芯光纤和磁流体的磁场传感器,磁场灵敏度为11.8 pm/Oe.2015年,Jianhua Luo等^[15]将微结构光纤(Microstructured Optical Fiber, MOF)和单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)熔接并在其上刻写长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)从而实现磁场测量.实验结果表明,磁场强度灵敏度为-0.0052 nm/Oe,温度灵敏度为-0.0449 nm/°C.

本文提出一种传感结构,以锥结构与花生锥结构级联的方式制作MZI并与磁流体一起封装于毛细管内,再与FBG级联构成传感头,实现了对磁场和温度的测量.由于MZ干涉峰和FBG的磁场、温度灵敏度不同,可通过敏感矩阵实现双参量的同时测量.

1 传感器原理

由MZ干涉结构发生干涉后输出透射谱强度可以表示为^[16]

$$I_{\text{out}} = k_1 k_2 I_{\text{in}} + \eta(1-k_1)(1-k_2) I_{\text{in}} + 2I_{\text{in}} \sqrt{\eta k_1 k_2 (1-k_1)(1-k_2)} \cos(\Delta\phi) \quad (1)$$

式中, k_1 和 k_2 分别为传输光在光纤锥结构和花生锥结构传输时的耦合系数, η 是包层模式的传输损耗, I_{in} 是输入光的光强, $\Delta\phi$ 是经中间段单模光纤的传输,纤芯模式和包层模式的相位差.

由于不同模式之间的传播常数不同,在传播相同距离后,不同的模式会产生相位差.纤芯模式和包层模式产生的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2)$$

式中, L 为两球形结构之间SMF的长度, λ 为真空中波长, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为纤芯和包层有效折射率之差.

当相位差满足 $\Delta\phi = (2m+1)\pi$ (m 是正整数)时发生相消干涉,结合式(2)可以得到干涉峰波长为

$$\lambda_{\text{Dip}} = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} \quad (3)$$

磁流体的折射率与外界磁场有关.外加磁场时,磁流体出现固相和液相的分离,引起磁流体有效介电常数的改变,从而改变磁流体的折射率.可以使用Langevin的经典理论来研究铁磁流体的折射率与外磁场之间的关系为

$$\epsilon_{\text{MF}} = \left\{ -\epsilon_{\text{col}}(1-f) - \epsilon_{\text{liq}}(f-1) + \sqrt{[\epsilon_{\text{col}}(1-f) + \epsilon_{\text{liq}}(f-1)]^2 + 4(1+f)^2 \epsilon_{\text{col}} \epsilon_{\text{liq}}} \right\} / [2(1+f)] \quad (4)$$

式中, ϵ_{col} 表示固相, ϵ_{liq} 表示液相的介电常数,满足关系式为

$$\epsilon_{\text{liq}} | M_{\text{s,eff}}(H) = n_{\text{MF}}^2 (M_{\text{s}} |_{H=0}) = (0.1573M_{\text{s}} + 1.3283)^2 \quad (5)$$

式中, $M_{\text{s,eff}}$ 表示磁流体的有效浓度, M_{s} 表示磁流体的初始浓度.

在式(4)中, f 是磁场的函数,满足关系为

$$f = (A_{\text{col}}/A)(1-A_{\text{col}}/A) \quad (6)$$

式中, A 表示磁流体所占区域, A_{col} 表示其中磁链所占区域.

已知磁流体的折射率与磁流体的有效介电常数满足关系为

$$n_{\text{MF}} = \sqrt{\epsilon_{\text{MF}}} \quad (7)$$

结合式(4)~(7),可以得到磁流体的折射率.外界磁场的变化改变磁流体的相态使其固液分离,继而磁流体的有效折射率发生改变^[17].当外界折射率发生改变,包层模式的有效折射率会受影响而纤芯模式的有效折射率不发生变化,故根据式(3),包层模式和纤芯模式的有效折射率差会发生变化,引起干涉峰波长发生漂移.

由耦合模理论可知,FBG的中心波长满足^[18]

$$\lambda_{\text{B}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (8)$$

式中, λ_{B} 是光纤布喇格光栅的中心波长, n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率, Λ 是光纤布喇格光栅周期.当外界温度变化时,热光效应和热膨胀效应会引起纤芯折射率和光栅周期的改变进而中心波长发生漂移.但外界折射率发生变化时对FBG并不产生影响.所以当磁场和温度同时改变时,干涉结构和FBG的波长漂移可以通过敏感矩阵表示,实现双参量同时测量,即

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{T1}} & K_{\text{H1}} \\ K_{\text{TFBG}} & K_{\text{HFBG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\begin{bmatrix} K_{T1} & K_{H1} \\ K_{TFBG} & K_{HFBG} \end{bmatrix}$ 是敏感矩阵, $\Delta\lambda_1$ 是马赫-曾德尔干涉峰的漂移量, $\Delta\lambda_{FBG}$ 为光纤布喇格透射峰的漂移量, K_{T1} 是 Dip_1 的温度灵敏系数, K_{TFBG} 为 Dip_{FBG} 的温度灵敏系数, K_{H1} 是 Dip_1 的磁场强度灵敏系数, K_{HFBG} 为 Dip_{FBG} 的磁场强度灵敏系数, 由于 FBG 对磁场不敏感, 故该参数为零. ΔT 和 ΔH 分别表示外界环境的温度和磁场强度的变化.

由式(9)变形后可得式(10), 即

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{HFBG} & -K_{H1} \\ -K_{TFBG} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $D = K_{T1}K_{HFBG} - K_{TFBG}K_{H1}$.

2 实验结果和分析

实验装置及传感结构如图 1. 电子显微镜下传感结构如图 2. 宽带光源 (Broadband Light Source, BBS) 发出的光从单模光纤入射, 进入锥形结构后, 纤芯中的一部分光进入包层激发起高阶包层模式, 另一部分光继续在纤芯中传播, 纤芯和包层中的光经过花生锥结构后, 包层中的光耦合回纤芯, 发生纤芯模式和包层模式之间的干涉, 形成干涉谱. 光继续传播经过 FBG 后, 满足布喇格波长的光被反射, 其余的光透射, 透射光传输到光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzers, OSA) 中, 通过观察到的透射谱检测被测参量的变化.

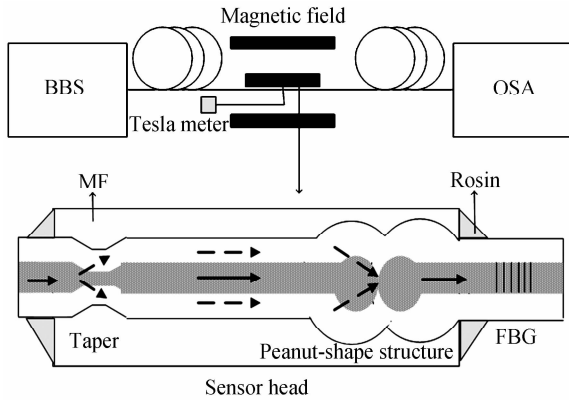


图 1 实验装置及传感结构

Fig. 1 Schematic diagram of experiment and sensor structure

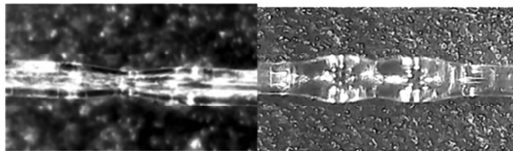


图 2 电子显微镜下传感结构

Fig. 2 Sensor structure under the electron microscope

2.1 结构参数讨论

光纤锥结构和花生锥结构之间的干涉长度 L 为 2.4 cm. 花生锥结构由熔接机 (FITELE S176) 制作而成, 首先, 分别用两段单模光纤的端面处熔球, 此时熔接参数修改为熔接强度 200, 放电时间 750 ms; 然后将两个

球形结构熔接形成花生锥结构, 此时熔接强度为 115, 熔接时间为 1 350 ms; 将距离花生锥 2.4 cm 的位置正对电极棒中心, 选择手动模式进行放电操作, 放电量为 175, 放电时间为 1 350 ms 进行拉锥操作, 最后将 MZI 和 FBG 连接起来. 将 MZI 部分和磁流体用毛细管封装. 实验中所用的磁流体为 EMG 605, 是一种高稳定的铁磁纳米水溶液, 铁磁纳米颗粒的平均直径小于 10 nm.

花生锥结构制作过程中, 制作球形结构时选取熔接机最大放电强度, 可获得直径 195 μm 左右的球形结构, 此时两个球形结构熔接形成的花生锥结构的消光比大. 且当光通过花生锥结构时可以扩大光束的模场直径, 可以实现将纤芯基模的部分能量耦合到高阶包层模中^[19].

图 3 为选取不同干涉长度时, 干涉结构的透射谱. 干涉长度与波长间隔成反比, 干涉长度越长, 波长间隔越小. 但传感头过长不利于实际测量与应用. 因此, 本实验中, 我们制作的传感头的干涉长度为 2.4 cm.

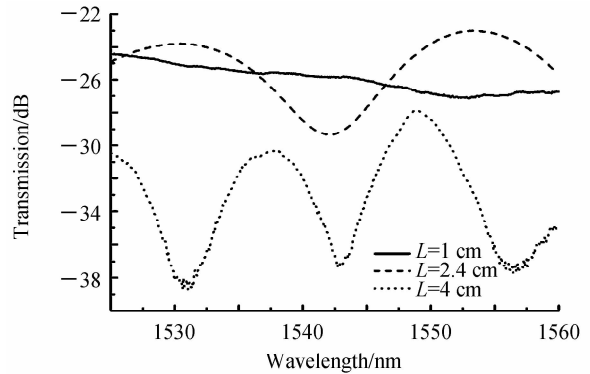


图 3 不同干涉长度的透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of different interference length

传感结构封装磁流体前后对比谱图如图 4, 其中干涉谷 Dip_1 在没封装磁流体前波长 1 546.21 nm, 当结构封装磁流体后 Dip_1 发生蓝移现象, 向短波长方向移动至 1 539.84 nm. 传感结构周围由空气变成磁流体环境, 纤芯和包层的有效折射率差变小, 特征波长向短波长方向移动. 由于磁场变化对 FBG 没有影响, 所以 FBG 的中心波长没有发生漂移.

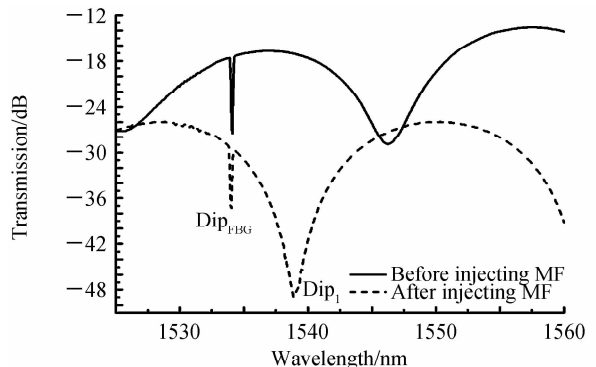


图 4 传感结构封装 MF 前后对比谱图

Fig. 4 Transmission spectrum before and after injecting MF

将图 4 所示封装的 MF 的透射谱进行傅里叶变换到频域,得到空间频率谱,如图 5. 由图可以看出,经模式耦合器耦合,激发出多种包层模式,能量主要集中在纤芯模式和峰值较高的主导包层模式,其他被激发的包层模式,即对应的峰值较低的部分,强度低,对于干涉谱影响较弱.

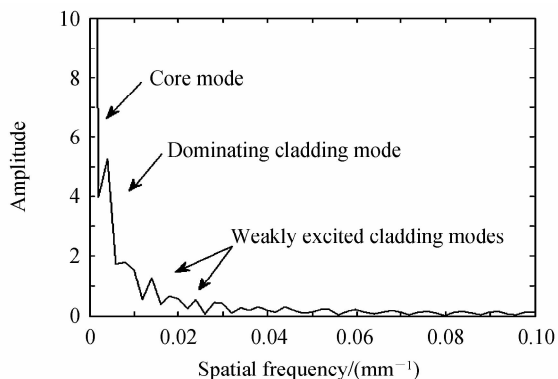


图 5 封装 MF 传感结构的空空间频谱

Fig. 5 Spatial frequency spectrum after injecting MF

2.2 磁场特性实验

将由毛细管和松香封装有磁流体的传感结构自然状态放置,以减少应力和弯曲对测量结果的影响. 在室温 25℃ 条件下,外加不同强度的磁场,磁场方向垂直于光纤轴,用特斯拉计来测量磁场强度,实验时,将磁场强度由 0mT 开始,每升高 2mT 进行一次测量和记录. 其中由于 FBG 对磁场不敏感,FBG 透射峰并不发生漂移. 当外界磁场强度的值继续增加至接近磁流体的饱和值,干涉谱特征波长趋于稳定值.

由图 6 可看出 Dip_{FBG} 对磁场强度不敏感,干涉峰不发生漂移. 磁场强度由 0 mT 变化到 20 mT, Dip_1 发生红移由 1 539. 84 nm 漂移至 1 542. 08 nm,共漂移 2. 24 nm. 由图 7 可以得出 Dip_1 的磁场灵敏度为 0. 11 nm/mT,当磁场强度超过 20 mT 后,由于磁饱和现象, Dip_1 几乎不再漂移. Dip_{FBG} 的漂移量则一直为零,磁场灵敏度为零.

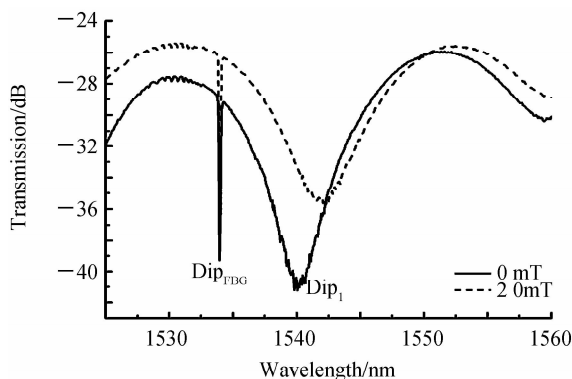


图 6 透射谱随磁场强度的漂移曲线

Fig. 6 Drift curves of transmission spectrum with changing of magnetic field intensity

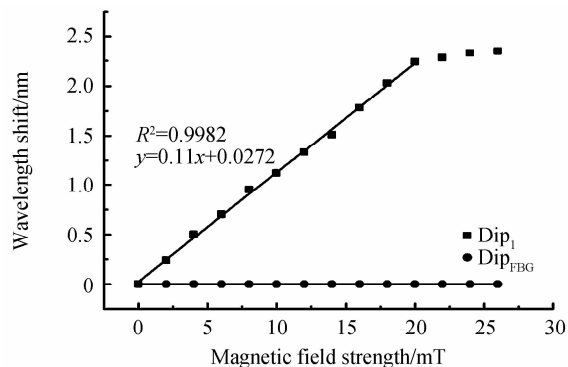


图 7 波长随磁场强度的变化关系

Fig. 7 Variable relationship between wavelength and magnetic field intensity

2.3 温度特性实验

将传感器自然状态放置于恒温板进行温度特性实验. 实验时,磁场强度保持 0 mT 不变,由室温 25℃ 开始测量,每升高 2℃ 进行一次测量和记录,直至升温至 43℃ 结束,透射谱随温度的漂移曲线如图 8.

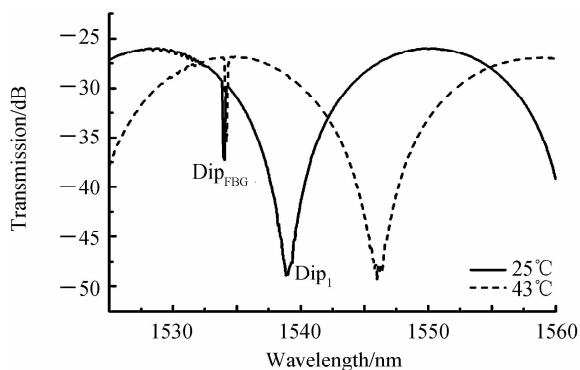


图 8 透射谱随温度的漂移曲线

Fig. 8 Drift curves of transmission spectrum with changing of temperature

实验结果表明,由于磁流体热光系数高于普通光纤材料热光系数两个数量级,但是由于热膨胀作用对传感结构的压力作用使波长漂移向短波长方向漂移,由图 9 可知,两者共同作用下 MZI 干涉谷 Dip_1 温度灵敏度高至 0. 401 5 nm/℃,FBG 温度灵敏度为 0. 011 4 nm/℃.

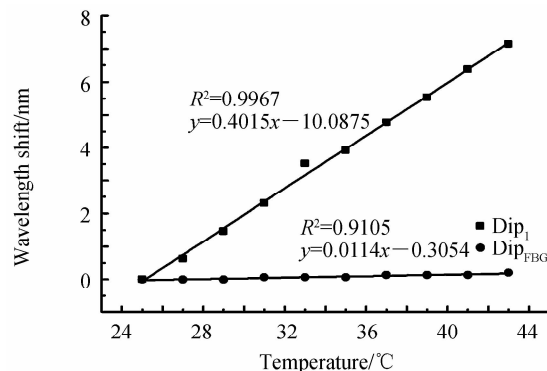


图 9 温度灵敏度响应曲线

Fig. 9 Temperature response characteristics curve

2.4 实验结果分析

由以上实验结果可以看出, Dip_1 对温度、磁场强度都灵敏, Dip_{FBG} 对温度灵敏. 将实验中测得的 Dip_1 和 Dip_{FBG} 的温度和磁场灵敏度系数代入式(10)可以得到波长变化量与温度、磁场改变量的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \frac{1}{-1.2 \times 10^{-3}} \begin{bmatrix} 0 & -0.11 \\ -0.0114 & 0.4015 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_{FBG} \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此,当外界环境的温度和磁场强度同时变化时,通过测量 Dip_1 和 Dip_{FBG} 的变化量并代入式(11)即可计算出相应的温度与磁场强度的变化值,实现温度与磁场的同时测量.

设 OSA 的光谱测量分辨率为 $\delta(\lambda)$,则同时进行的磁场和温度测量的分辨率 $\delta(H)$ 和 $\delta(T)$ 表示为

$$\begin{bmatrix} \delta(T) \\ \delta(H) \end{bmatrix} = \frac{1}{|D|} \begin{bmatrix} |K_{HFBG}| & |-K_{H1}| \\ |-K_{TFBG}| & |K_{T1}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(\lambda) \\ \delta(\lambda) \end{bmatrix} \quad (12)$$

若 OSA 的光谱测量分辨率为 0.01 nm,将实验所得数据代入式(12),得到传感结构温度和磁场测量的分辨率分别为 0.92 °C 和 3.44 mT.由式(12)可知,温度和磁场的测量分辨率受 OSA 光谱测量分辨率及各参量灵敏度系数的影响.传感结构测量分辨率越小性能越优异.

3 结论

本文设计并制作了一种 MZI 与 FBG 级联的光纤磁场传感器,由锥结构和花生锥结构组成 MZI,用磁流体封装于毛细管中,再级联 FBG 构成传感头.利用此传感结构对磁场、温度进行了实验测量,实验表明,MZ 干涉结构产生的干涉峰对磁场、温度强度都敏感,灵敏度分别为 0.11 nm/mT,0.4015 nm/°C. FBG 透射峰的温度灵敏度为 0.0114 nm/°C,对磁场不灵敏.因此,该传感结构能够实现双参量同时测量,在航天、冶金和医疗等领域都有广泛的应用价值.

参考文献

- [1] LAYEGHI A, LATIFI H, FRAZAO O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid [J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(19):1904-1907.
- [2] LEI Xue-qin, CHEN Jia-jia, SHI Fu-quan, et al. Magnetic field fiber sensor based on the magneto-birefringence effect of magnetic fluid[J]. *Optics Communications*, 2016, **374**:76-79.
- [3] GAO Lei, ZHU Tao, DENG Ming, et al. Long-period fiber grating within D-shaped fiber using magnetic fluid for magnetic-field detection[J]. *Photonics Journal*, 2012, **4**(6): 2095-2104.
- [4] BAI Zhi-yong, ZHANG Wei-gang, GAO She-cheng, et al. Compact long period fiber grating based on periodic micro-core-offset[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(21): 2111-2114.

- [5] ANDRE R M, BIAZOLI C R, SILVA S O, et al. Strain-temperature discrimination using multimode interference in tapered fiber[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(2): 155-158.
- [6] FRAZAO O, MARTYNKIEN T, BAPTISTA J M, et al. Optical refractometer based on a birefringent bragg grating written in an H-shaped fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(1): 76-78.
- [7] NI Xiao-jing, HUANG Min. Faraday effect optical current/magnetic field sensors based on cerium-substituted yttrium iron garnet single crystal [C]. Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), 2010 Asia-Pacific:1-4.
- [8] CHENG Ling-hao, HAN Jian-lei, GUO Zhen-zhen, et al. A novel miniature magnetic field sensor based on faraday effect using a heterodyning fiber grating laser [C]. 2012, Photonics Global Conference(PGC): 1-4.
- [9] BAUDENDISTEL T A, TURNER M L. A novel inverse magnetostrictive force sensor[J]. *Sensors Journal*, 2007, **7**(2): 245-250.
- [10] WANG Xiang, PU Sheng-li, JI Hong-zhu, et al. Enhanced magnetic-field-induced optical properties of nanostructured magnetic fluids by doping nematic liquid crystals [J]. *Nanoscale Research Letters*. 2012, **7**(20): 1421 - 1421.
- [11] DENG Hai-dong, LIU Jin, ZHAO Wei-ren, et al. Enhancement of switching speed by laser-induced clustering of nanoparticles in magnetic fluids[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(23): 233103.
- [12] ZU Peng, CHAN Chi-chiu, LEW Wen-siang, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2):491-498.
- [13] WU Ji-xuan, MIAO Yin-ping, WEI Lin, et al. Dual-direction magnetic field sensor based on core-offset microfiber and ferrofluid [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2014, **26**(15): 1581-1584.
- [14] HUANG Guo-jing, ZHOU Bin, CHEN Zhuo, et al. Magnetic-field sensor utilizing the ferrofluid and thin-core fiber modal interferometer [J]. *Sensors Journal*, 2015, **15**(1): 333-336.
- [15] LUO Jian-hua, ZHANG Gui, XIE Nan-jie, et al. A magnetic sensor based on a hybrid long-period fiber grating and a magnetic fluid [J]. *Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(9): 998-1001.
- [16] TONG Zheng-rong, LUAN Pan-pan, CAO Ye, et al. Optical fiber magnetic field sensor based on cascaded down-taper and spherical structure [J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(8): 087106-1-087106-4.
- [17] LUAN Pan-pan. Research on interferometric sensor based on optical fiber taper structure[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015:25.
栾盼盼. 基于光纤锥结构的干涉型传感器研究[D]. 天津:天津理工大学, 2015:25.
- [18] HILL K O, MELTZ G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**:1263-1276.
- [19] WU Di. Study on optical fiber sensors based on the fiber structures with mode-field abrupt change [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012:13-19.
吴迪. 基于光纤模场突变结构的光纤传感器研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012:13-19.